

АКУСТИЧЕСКАЯ ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 534.231

DOI: 10.29006/978-5-9901449-5-8-11

**Н.Г. Бибиков¹, О.Е. Попов², Г.В. Кенигсбергер³, М.П. Иванов⁴,
И.В. Макушевич¹, И.П. Нешенко³, А.Н. Серебряный^{1,5}**

МОНИТОРИНГ ВРЕМЕННОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗВУКОВОЙ АКТИВНОСТИ РАКОВ-ЩЕЛКУНОВ НА ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

¹*АО Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева
Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, 4,
Тел. +7 916 392-32-63, E-mail: nbibikov1@akin.ru*

²*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3, E-mail: olegp@mail.ru*

³*Институт экологии АН Абхазии, Абхазия, 384905, Сухум, ул. Красномаяцкая, 67,
E-mail: kenigsbergger@mail.ru*

⁴*Санкт-Петербургский гос. Университет
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9,
E-mail: 20mivanov@mail.ru*

⁵*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36,
E-mail: serebriany@mail.ru*

Исследовались высокочастотные сигналы, генерируемые раками-щелкунами в нескольких акваториях восточного побережья Черного моря. Изучались характеристики этих сигналов и распределение раков-щелкунов по акватории. Подробно изучено временное распределение сигналов и проведена акустическая идентификация отдельных особей.

Ключевые слова: высокочастотные шумы, морской шельф, раки-щелкуны, идентификация объекта

В течение последних десятилетий в некоторых акваториях шельфа Черного моря были зарегистрированы мощные высокочастотные шумы импульсной природы. Эти сигналы излучаются раками-щелкунами в результате кавитационного процесса и имеют весьма характерную форму, состоящую из трех фаз: импульс отрицательного давления выброса

струи воды, затем сравнительно продолжительный импульс положительного давления при образовании и росте кавитационной полости и последующего мощного ударного импульса отрицательного давления, вызванного схлопыванием кавитационной полости. Кроме прямого сигнала на приемник звука приходит отражение от поверхности воды, дна и близлежащих подводных объектов. Характеристики сигналов, излучаемых раками-щелкунами (в зарубежной литературе – “snappingshrimps”), к настоящему времени хорошо описаны в лабораторных условиях [1]. Однако при исследовании в природе обычно не удается анализировать отдельные импульсы, так что эти сигналы трактуются, главным образом, как непрерывный высокочастотный шум [2].

Мы наблюдали акустическую активность этих животных в течение длительного времени в разные времена года и время суток [3–7]. Сравнительно невысокая плотность этих животных в Черном море позволяет оценить особенности их популяционного поведения, а также осуществить акустическую идентификацию положения конкретных излучающих особей и подробно исследовать вариации характеристик сигналов.

Изучение спектра одиночного сигнала рака-щелкуна, относящегося к виду *Alpheusdentipes*, в естественных условиях Черного моря было осуществлено на базе Карадагского государственного заповедника им. Вяземского [7]. Использовали широкополосный гидрофон TC4014-5 фирмы RESON с верхней частотой до 480 кГц. Было определено, что спектр сигнала простирается до частот 350 кГц.

Иллюстрированный фрагмент записи (рис. 1а) содержит основной импульс и эхо-сигнал от границ сред с задержкой около 700 мкс. Длительность основного высокоамплитудного ударного импульса можно оценить по осциллограмме (рис. 1б), где интервал между точками

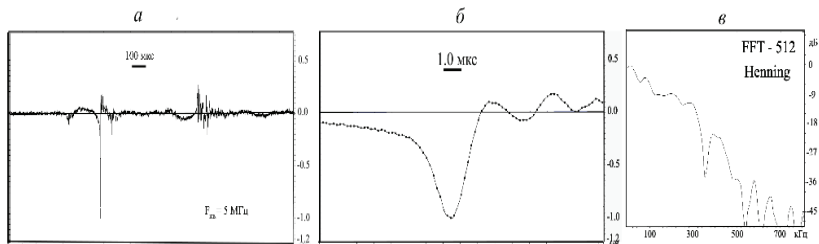


Рис.1. Осциллограмма высокочастотного импульса и эхо-сигнала, отраженного от границы вода–воздух; а – полный фрагмент сигнала; б – ударный импульс с разверткой 1 мкс/дел.; в – спектральная плотность мощности.

всего 0.2 мкс, а масштаб измерения составляет 1 мкс. Длительность (рис. 1б) склона от максимума (вправо) до пересечения с нулевой линией составляет 1.6 мкс. Ограничение частотной полосы основного колебательного процесса до 350 кГц (рис. 1в), возможно, связано с малой шириной частотной полосы сквозного тракта регистрации. Дальнейшая работа с расширенной полосой частот приемного тракта позволит более углубленно исследовать процесс излучения и понять, как формируется пространственная характеристика поля излучения такого ударного импульса.

Основные экспериментальные данные были получены в районе мыса Сухумский на базе Гидрофизического института и Института экологии Академии наук Абхазии в течение шести лет: 2015 (октябрь), 2016 (сентябрь), 2017 (октябрь), 2018 (июнь), 2019 (июнь, октябрь) и 2020 (февраль–март). Общее время записи составило более 700 часов. Регистрация проводилась в лаборатории, расположенной на сваях на расстоянии около 30 м от берега. В месте, где были зафиксированы сигналы раков-щелкунов, дно имело наклон около $25\text{--}30^\circ$, а глубина морского дна увеличилась с 5 до 12 м. Поверхность дна была покрыта галькой и раковинами мидий. Высокочастотная помеха сводилась почти исключительно к сигналам дельфинов, которые по своим частотным свойствам попадали в полосу сигналов рака-щелкуна.

Регистрация биологической активности осуществлялась с помощью предварительно откалиброванных гидрофонов, которые были либо установлены в 30–40 см у дна, либо располагались на глубинах от 4 до 10 м. Положение гидрофона можно было контролировать с помощью видеокамеры и дайверов. Приемный тракт обычно имел сравнительно равномерную частотную характеристику в диапазоне до 120 кГц. При продолжительном рутинном мониторинге биошумов регистрация осуществлялась в диапазоне частот до 20 кГц (частота квантования 44 кГц). Однако время от времени осуществлялись короткие 5-минутные записи с частотой квантования 196 кГц. При таком контроле можно было убедиться, что и в ограниченном частотном диапазоне все основные особенности сигналов раков-щелкунов качественно сохраняются неизменными.

Обработка сигналов начиналась с отбора импульсных сигналов, превышающих заданный порог. Затем выбранные по порогу импульсы просматривались оператором, который проводил вторичный отбор, сравнивая форму импульсов с типичным сигналом рака-щелкуна.

Иногда использовалась программа Spike 2, в которой отдельные щелчки идентифицировались по форме. Дополнительно записи прове-

ряли на предмет устранения артефактов. Несмотря на это, в некоторых длительных регистрациях в анализ могли быть включены и другие высокочастотные импульсы, в том числе короткие пакеты импульсов, генерируемые черноморскими дельфинами. Кроме того, некоторые сильные щелчки сопровождалась инвертированным отражением от поверхности. Поскольку время задержки эхо-сигнала относительно начального щелчка никогда не превышало 20 мс, мы обычно исключали из анализа все сигналы, следующие с интервалами, меньшими этого значения.

Для статистического анализа длительных регистраций использовали сформированный в результате триггирования дискретный процесс, представленный последовательностью интервалов между интенсивными щелчками, частота следования которых в условиях наших регистраций обычно варьировалась около одного Гц. Для характеристики этого процесса использовали ряд статистических методов. Оценивали среднюю частоту следования, гистограмму распределения интервалов между щелчками, коэффициент вариации, наклон двумерного распределения интервалов между парами последовательных интервалов, степень пачковости процесса. Получали также функцию автокорреляции и функцию риска.

Для анализа фрактальных свойств зарегистрированных последовательностей использовали несколько оценок, в том числе предложенные Фано и Алланом [6]. Фактор Фано определяется как отношение дисперсии числа импульсов за фиксированный интервал времени к среднему значению этого числа, а фактор Аллана характеризует степень разброса соседних интервалов. Получали функции зависимости этих величин от длительности интервала времени анализа, которые для чисто случайного процесса должны варьировать вокруг единицы, независимо от значений аргумента. Если значения этих функции на заданном временном интервале меньше единицы, это может указывать на наличие периодических составляющих. Если же функции характеризуются степенной зависимостью, проявляющейся в их линейном росте в двойном логарифмическом масштабе, то процесс можно рассматривать с точки зрения теории фракталов. В значительном большинстве осуществленных нами регистраций проявлялись именно фрактальные особенности процесса.

Мы также использовали индекс Херста, основанный на анализе временной зависимости разности максимумов и минимумов исследуемого параметра (в нашем случае интервалов между сигналами). Для чисто случайного процесса показатель степени этой зависимости должен варьировать вокруг значения 0.5, но в большинстве природных процессов проявляются фрактальные свойства, приводящие к увеличению

данного индекса. Такой эффект наблюдали и для регистрируемых нами длительных последовательностей щелчков.

Особенность нашего подхода состояла в том, что мы оценивали динамику индекса Херста для последовательно смещаемых временных участков. Данная методика позволяет выявить наличие локальных трендов. Ее применение для анализа последовательности щелчков позволило продемонстрировать чрезвычайно высокую изменчивость процесса. Пример поведения показателя Херста при двух регистрациях, выполненных 7 и 8 сентября 2016 г., приведен на рис. 2. В первом случае (рис. 2а) до и после небольшого участка с выраженным трендом активность популяции в течение довольно длительного времени была близка к случайной. В другой регистрации (рис. 2б) эта активность почти все время характеризовалась наличием трендов. При этом переходы от чисто

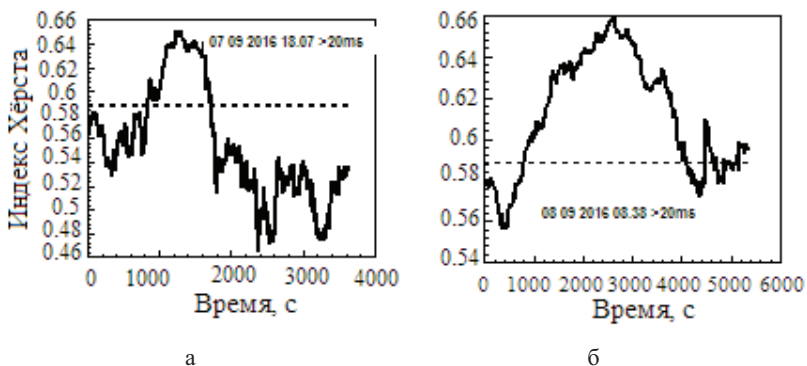


Рис. 2. Динамика индекса Херста в течение двух записей. Цифрами на графиках указано время начала регистрации. Значения выше пунктирной линии соответствуют достоверному наличию тренда.

случайной активности к тем участкам, на которых частота следования закономерно увеличивалась или уменьшалась, могли быть как весьма резкими, так и плавными. Таковую особенность можно было частично объяснить наличием выявленной в лаборатории положительной обратной связи между числом активных особей и частотой излучения сигналов отдельной особью [1].

Кроме того, очевидна зависимость частоты следования сигналов от медленно изменяющихся внешних условий, прежде всего, от температуры и освещенности. Так в субтропических водах Атлантики отмечали смену предпочтения между зимними и летними месяцами [8]. Зимой максимум активности наблюдался днем, а летом – ночью. Однако в наших записях суточные вариации частоты следования щелчков оказались

не сильно выраженными. Возможно, это объяснялось тем, что регистрация обычно осуществлялась в начале лета или осенью.

Спорадические попытки регистрации высокочастотных биошумов в зимние месяцы не выявили звуковой активности раков-щелкунов. По нашим последним данным, она начинает восстанавливаться по мере прогрева воды в течение марта–мая.

Наряду с анализом временных свойств самого процесса генерации щелчков во всей изучаемой популяции была поставлена и задача идентификации единичных сигналов. Для этих целей использовали несколько приемов. Поскольку отдельные сигналы со сравнительно высокой амплитудой легко выделялись из шума, их можно было классифицировать непосредственно по форме, зависящей как от параметров самого щелчка, так и от особенностей окружения. Использовалось программное обеспечение, позволявшее вычислить взаимную корреляцию формы всех пар зарегистрированных сигналов с целью выявления щелчков, излученных, вероятнее всего, одним объектом и из одной точки пространства. Для контроля расстояния до точки излучения можно было использовать величину задержки между приходом на гидрофон исходного сигнала и эхо от водной поверхности.

Для более точной локализации источника использовали пеленгатор – систему из трех гидрофонов. Направление на источник определялось с точностью примерно 1° . Расстояния до источников сигналов можно было оценить, зная рельеф дна, по измеренным углам прихода сигналов в горизонтальной и вертикальной плоскости. Близкий метод был использован другими авторами для локализации раков-щелкунов залива Петра Великого [9], где раки-щелкуны были выявлены еще в прошлом столетии [10].

Методики, использованные нами для изучения поведения раков-щелкунов, впервые позволили выявить интересные особенности

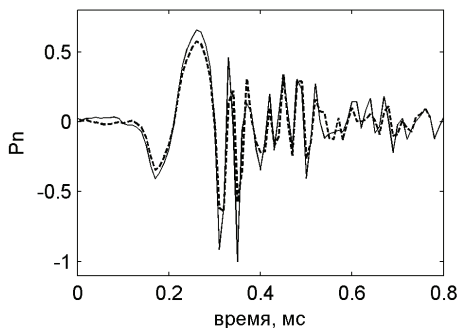


Рис. 3. Два нормированных по общему максимуму сигнала, излученных предположительно одной особью (с одного направления) с интервалом 1.1 секунды, весьма сходны между собой по форме.

их поведения в природе. Выяснилось, что некоторые особи могут излучать щелчки с интервалом порядка одной секунды, притом, что средний интервал между сигналами одной особи составляет десятки или даже сотни секунд. Характерный пример такой пары щелчков приведен на рис. 3. Вероятно, что эта одна из важных особенностей, определяющих специфику распределения щелчков в популяции.

Отметим актуальность исследования высокочастотного биошума, создаваемого раками-щелкунами (щелкающими креветками), для мониторинга экологического состояния акватории, а также для оценки их возможного влияния на функционирование гидроакустических систем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 19-52-10007 Абх.

Литература

1. Lillis A., Perelman J.N., Panyi A., Aran Mooney T. Sound production patterns of big-clawed snapping shrimp (*Alpheus* spp.) are influenced by time-of-day and social context // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2017. Vol. 142. No. 5. P. 3311–3320. DOI: 10.1121/1.5012751.
2. Mathias D., Gervaise C., Iorio L.D. Wind dependence of ambient noise in a biologically rich coastal area // *J. Acoust. Soc. Am.* 2016. Vol. 139. P. 839–850.
3. Bibikov N.G. Snapping shrimp clicks in the coastal water // *Proceed. 17 Int. Congress on Sound and Vibration*. Cairo, 2010. Section S55. P. 1–8.
4. Bibikov N.G. The statistical characteristics of the distribution of snapping shrimps clicks in the Russian coastal waters // *Proceedings of Meetings on Acoustics*. Acoustical Society of America. 2015. Vol. 24. No. 1.
5. Бибииков Н.Г. Биошумы шельфа южных морских рубежей России и Абхазии // *Акустика океана. Доклады 15-ой школы-семинара акад. Л.М. Бреховских*. М.: ГЕОС, 2016. С. 162–165.
6. Бибииков Н.Г., Макушевич И.В. Статистические характеристики высокочастотных шумов шельфовой зоны Черного моря // «Акустика океана». Труды XVI школы-семинара им. Акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2018. С. 169–172.
7. Bibikov N.G., Ovchinnikov O.B., Ivanov M.P., Serebryany A.N. Snapping shrimps sounds in the Black Sea // *Proceedings of 23 International Kongress on Acoustics*. Aachen. 2019. P. 4459–4464. <http://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/001376.pdf>.
8. Bohnenstiehl D.R., Lillis A., Eggleston D.B. The curious acoustic behavior of estuarine snapping shrimp: Temporal patterns of snapping shrimp sound in sub-tidal oyster reef habitat // *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11. e0143691.
9. Рутенко А.Н., Радаев И.Р., Ущиповский В.Г. Натурные и модельные исследования акустических импульсов, генерируемых раком-щелкуном // «Физика Геосфер». Труды XI-ого Всероссийского симпозиума. В.: 2019. С. 181–185.
10. Бибииков Н.Г., Грубник О.Н. Мониторинг звуков, создаваемых раками-щелкунами на мелководье Дальнего Востока // *Акустический мониторинг сред*. М.: АКИИ, 1993. С. 83–84.

**N.G. Bibikov¹, O.E. Popov², G.V. Konigsberger³, M.P. Ivanov⁴,
I.V. Makushevich¹, I.P. Neshenko³, A.N. Serebriany^{1,5}**

**MONITORING OF THE TEMPORAL AND SPATIAL
DISTRIBUTION OF SNAPPING SHRIMPS CLICKS ON THE
BLACK SEA SHELF**

¹*JSE N.N. Andreev Acoustical Institute*

Russia, 117036, Moscow, Shvernik st., 4,

tel. 8(916)393-32-63, E-mail: nbibikov1@akin.ru

²*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS*

Russia, 119017, Moscow, Pizhevsky per., 3, E-mail: olegp@mail.ru

³*Institute of Ecology, Academy of Sciences of Abkhazia,*

Abkhazia, 384905, Sukhum, Krasnomayatskaya st., 67,

E-mail: kenigsbergerg@mail.ru

⁴*M.V. Lomonosov Petersburg State University*

Russia, 199034, St. Petersburg, Universitetskaya nab., 7–9,

E-mail: 20mivanov@mail.ru

⁵*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences*

Russia, 117997, Moscow, Nakhimovsky Prospekt, 36,

E-mail: serebriany@mail.ru

We investigated the high-frequency noise generated by snapping shrimps at several points on the eastern coast of the Black Sea. The frequency parameters of these signals and their distribution over the water area were studied. At a fixed point, the temporal distribution of clicks was studied in detail and the acoustic identification of individual individuals was carried out.

Keywords: high-frequency noise, offshore, snapping shrimp, object identification

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 19-52-10007 Abkh.

References

1. Lillis A., Perelman J.N., Panyi A., and Aran Mooney T. Sound production patterns of big-clawed snapping shrimp (*Alpheus* spp.) are influenced by time-of-day and social context. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, Vol. 142, No. 5, pp. 3311–3320, doi: 10.1121/1.5012751.
2. Mathias D., Gervaise C., and Iorio L.D. Wind dependence of ambient noise in a biologically rich coastal area. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2016, 139, pp. 839–850.
3. Bibikov N.G. Snapping shrimp clicks in the coastal water. *Proc. 17 Int. Congress on Sound and Vibration*, Cairo: 2010, Section S55, pp. 1–8.
4. Bibikov N.G. The statistical characteristics of the distribution of snapping shrimps clicks in

- the Russian coastal waters. Proceedings of Meetings on Acoustics. Acoustical Society of America, 2015, Vol. 24, No. 1.
5. Bibikov N.G. Bio-noise of the shelf of the southern sea borders of Russia and Abkhazia. Ocean Acoustics, Proceedings of the XV-th Brekhovskikh's Conference Reports, Moscow: GEOS, 2016, pp. 162–165, [in Russian].
 6. Bibikov N.G. and Makushevich I.V. Statistical characteristics of high-frequency noise of the shelf zone of the Black Sea. Acoustics of the ocean. Proceedings of the XVI-th Brekhovskikh's Conference Reports, Moscow: GEOS, 2018, pp. 169–172, [in Russian].
 7. Bibikov N.G., Ovchinnikov O.B., Ivanov M.P., and Serebryany A.N. Snapping shrimps sounds in the Black Sea. Proceedings of 23-th International Congress on Acoustics, Aachen, 2019, pp. 4459–4464, <http://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/001376.pdf>.
 8. Bohnenstiehl D.R., Lillis A., and Eggleston D.B. The curious acoustic behavior of estuarine snapping shrimp: Temporal patterns of snapping shrimp sound in sub-tidal oyster reef habitat. PLoSONE, 2016, Vol. 11, e0143691.
 9. Rutenko A.N., Radaev I.R., and Ushchipovsky V.G. Full-scale and model studies of acoustic impulses generated by the clickfish. Proceedings of the XI-th All-Russian Symposium “Physics of the Geospheres”, Vladivostok: 2019, pp. 181–185, [in Russian].
 10. Bibikov N.G. and Grubnik O.N. Monitoring of sounds created by cracker crayfish in the shallow waters of the Far East. “Acoustic Monitoring of Media”, Moscow: AKIN, 1993, pp. 83–84, [in Russian].